



TITLE:

A study of microho1low cathode discharge plasmas by laser absorption spectroscopy of excited helium atoms( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Ueno, Keisuke

---

CITATION:

Ueno, Keisuke. A study of microho1low cathode discharge plasmas by laser absorption spectroscopy of excited helium atoms. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21756>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	上野 佳祐
論文題目	A study of microhollow cathode discharge plasmas by laser absorption spectroscopy of excited helium atoms （励起ヘリウム原子のレーザー吸収分光によるマイクロホローカソード放電プラズマの研究）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、近年注目されている大気圧プラズマの発生源の1つであるマイクロホローカソード放電の挙動理解に向けたプラズマパラメータ（励起原子密度、ガス温度、電子密度、電場強度）の空間分布計測を目的として、プラズマ中に生成される励起ヘリウム原子のレーザー吸収スペクトル計測を用いて行った研究をまとめたものであり、6章から構成されている。</p> <p>第1章は序論である。薄膜生成プロセスや医療への応用などが期待されている大気圧プラズマの特徴とその発生源について先行研究を紹介しつつ説明し、励起寿命の長いヘリウム準安定原子密度の計測をはじめとするプラズマパラメータ評価の重要性を指摘している。さらに、スペクトル計測を用いたプラズマパラメータ評価の先行研究を紹介しつつ、周波数分解能が十分高いレーザー吸収分光の有効性を述べている。</p> <p>第2章は、本論文を読み進める上で必要となる基礎事項についてまとめた章である。2.1節ではマイクロホローカソード放電のメカニズムとプラズマの空間分布について述べている。2.2節では本研究で観測するヘリウム原子の2つの励起準位（<math>2^3\text{S}</math>、<math>2^1\text{P}</math> 準位）の純ヘリウムプラズマ中での生成・消滅に関する素過程を説明している。2.3節ではレーザー吸収分光の原理、およびスペクトル広がりやガス温度や電子密度との関係、電場によるスペクトルシフトについて説明している。</p> <p>第3章では、ヘリウム原子 <math>2^3\text{S}</math>–<math>2^3\text{P}</math> 遷移のレーザー吸収分光システムの開発とそのシステムを用いて行ったガス圧力範囲 10–80 kPa、直径 0.3 mm のマイクロホローカソード放電プラズマの計測に関して述べている。3.1節ではレーザー吸収分光システムの光学系の構築とレーザービーム径の測定による空間分解能の評価、レーザー光周波数の掃引とその較正について述べている。3.2～3.4節ではマイクロホローカソード放電プラズマに対する吸収スペクトル計測実験について述べている。3.5節、3.6節ではそれぞれスペクトル解析から得られたプラズマのガス温度、準安定原子である <math>2^3\text{S}</math> 原子の密度の2次元空間分布を示し、空間分解能 60 <math>\mu\text{m}</math> でそれらが計測可能であることを示している。</p> <p>第4章では、同一のプラズマに対して <math>2^3\text{S}</math>–<math>2^3\text{P}</math> 遷移に加えて <math>2^1\text{P}</math>–<math>3^1\text{D}</math> 遷移も合わせてレーザー吸収スペクトルを計測したことについて述べている。4.1節では電極の表面状態によって放電状態が変化することについて触れ、同一電極による同一放電状態のプラズマに対して2つの遷移の吸収スペクトルを計測することの必要性について述べている。さらに <math>2^3\text{S}</math>–<math>2^3\text{P}</math> 遷移の解析から <math>2^3\text{S}</math> 原子密度、ガス温度、<math>2^1\text{P}</math>–<math>3^1\text{D}</math> 遷移の解析から <math>2^1\text{P}</math> 原子密度、電子密度、電場強度が評価できることを提案している。4.2節ではそのために構築した2遷移計測システムの概要を説明している。4.3節ではガス圧力範囲 10–80 kPa、直径 0.3 mm のプラズマに対して得られた2つの遷移の典型的なスペクトルを示し、その解析手法について述べている。4.4節では得られた <math>2^3\text{S}</math> 原子密度、<math>2^1\text{P}</math> 原子密度、ガス温度、電子密度、電場強度の2次元空間分布を示している。電場強度の分布からシース長が 10, 20 kPa では 50–100 <math>\mu\text{m}</math>、60, 80 kPa では 50 <math>\mu\text{m}</math> 程度</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	上野 佳祐
<p>と見積られ、<math>2^3\text{S}</math>、<math>2^1\text{P}</math> 原子密度のピークが 10, 20 kPa でプラズマの中心部にあること、60, 80 kPa で電極近くにシフトすることとの関連を説明している。4.5 節では得られた <math>2^3\text{S}</math> 原子密度、<math>2^1\text{P}</math> 原子密度、ガス温度、電子密度と 2.2 節で挙げた各素過程の衝突断面積を用いて、<math>2^3\text{S}</math> 原子、<math>2^1\text{P}</math> 原子の生成・消滅速度の電子温度依存性を計算している。さらにプラズマ中の電子エネルギー分布関数の評価から、<math>2^3\text{S}</math> 原子、<math>2^1\text{P}</math> 原子の生成は電子衝突による基底状態からの直接励起、<math>2^3\text{S}</math> 原子の消滅は電子衝突による励起、<math>2^1\text{P}</math> 原子の消滅は電子衝突による励起・脱励起が支配的である機構モデルを提案している。<math>2^3\text{S}</math> 原子、<math>2^1\text{P}</math> 原子の計測された密度とそれらの生成速度のガス圧力依存性の比較から、それらの消滅速度が 2.2 節で挙げた素過程だけでは説明できないことを明らかにし、励起原子の輸送や他の消滅過程を考慮する必要性を指摘している。</p> <p>第 5 章では、<math>2^3\text{S}</math>–<math>2^3\text{P}</math> 遷移と <math>2^1\text{P}</math>–<math>3^1\text{D}</math> 遷移の吸収スペクトル計測位置を物理的に一致させるために行った 2 遷移同時計測システムの開発と直径 1 mm のマイクロホローカソード放電プラズマに対する計測について述べている。5.1 節では 2 遷移同時計測を行う必要性、5.2 節ではそのために構築した計測システムを説明している。5.3 節では 5–60 kPa で得られた典型的なスペクトルを示し、5.4 節では解析から得られた <math>2^3\text{S}</math> 原子密度、<math>2^1\text{P}</math> 原子密度、ガス温度、電子密度の 2 次元空間分布を示している。5.5 節では 4.5 節で提案したモデルに基づいて、プラズマ中心部と電極近傍で評価された <math>2^3\text{S}</math> 原子密度、<math>2^1\text{P}</math> 原子密度とそれらの生成速度の圧力依存性を比較している。その結果、プラズマサイズやプラズマ中の位置に依存する消滅過程の存在が示唆されることを示している。</p> <p>第 6 章は、総括であり、本論文で得られた知見についてまとめている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

大気圧プラズマは、ガス温度は比較的低温のまま電子温度のみ高温であるため、熱負荷が小さく化学反応性が高いという特徴があり、薄膜生成プロセスや医療への応用などが期待されている。高い圧力での放電には電極間隔を狭くする必要があり、そのプラズマの挙動を理解するには、高い空間分解能でのプラズマパラメータ（励起原子密度、ガス温度、電子密度、電場強度）の評価が求められている。本研究は、レーザー光を用いてヘリウム原子の  $2^3S-2^3P$  遷移と  $2^1P-3^1D$  遷移のスペクトルを高精度に計測することにより、マイクロホローカソード放電に対してこれらのプラズマパラメータの空間分布計測を行うとともに、プラズマ中でのヘリウム原子の励起機構について知見を深めている。主な内容は以下の通りである。

(1) ヘリウム原子  $2^3S-2^3P$  遷移のレーザー吸収分光システムを開発し、ガス圧力範囲 10-80 kPa の直径 0.3 mm のマイクロホローカソード放電プラズマに対して空間分解能 60  $\mu\text{m}$  で準安定( $2^3S$ )原子密度とガス温度の 2 次元分布計測が可能であることを示した。

(2) ヘリウム原子の  $2^3S-2^3P$  遷移の吸収スペクトル計測より  $2^3S$  原子密度とガス温度が評価でき、その結果と組み合わせた  $2^1P-3^1D$  遷移の吸収スペクトル計測より励起( $2^1P$ )原子密度、電子密度、電場強度が評価できることを提案した。実際に同一の放電状態で両遷移のレーザー吸収スペクトルを計測し、これらのプラズマパラメータの評価ができることを実証した。

(3)  $2^3S-2^3P$  遷移と  $2^1P-3^1D$  遷移を同時に計測するシステムを構築し、5-60 kPa、直径 1.0 mm のプラズマに対してレーザー吸収スペクトルを計測した。2 遷移同時計測のために空間分解能が 120  $\mu\text{m}$  となったものの、 $2^3S$  原子密度、ガス温度、 $2^1P$  原子密度、電子密度の 2 次元空間分布を評価した。

(4) 得られたプラズマパラメータと  $2^3S$  原子、 $2^1P$  原子に関する電子衝突断面積を用いてこれらの励起原子の生成・消滅速度の電子温度依存性を計算した。さらにプラズマ中の電子エネルギー分布関数の評価から、これらの励起原子の生成・消滅に関する機構モデルを提案した。 $2^3S$  原子、 $2^1P$  原子の密度の計測とモデル計算のガス圧力依存性の比較から、消滅速度が電子衝突過程だけでは説明できないことを明らかにし、励起原子の輸送や他の消滅過程を考慮する必要性を指摘した。

これらの成果は、大気圧プラズマを生成するようなマイクロプラズマの診断という課題に対して、励起ヘリウム原子のレーザー吸収分光法によりプラズマパラメータの 2 次元空間分布計測が可能であることに明らかにしており、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 31 年 1 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。